ChinaXiv合作期刊 图书情报工作
第63卷 第23期 2019年12月

基于引文的跨学科领域发展路径分析*
——以眼动追踪领域为例

梁镇涛[1] 巴志超[2] 徐健[3]
[1] 武汉大学信息资源研究中心 武汉 430072 [2] 南京理工大学经济管理学院 南京 210094
[3] 中山大学资讯管理学院 广州 510006

摘要：[目的/意义]跨学科研究已成为现代科学创新研究的重要范式和必然趋势，探究跨学科领域中学科的发展模式与演化路径，对于揭示跨学科领域形成与发展的动态过程具有重要意义。[方法/过程]以眼动追踪(Eye Tracking, ET)领域为例，对文献引文关系进行提取与学科标注，构建文献和学科层面的引文关系网络；计算各学科的他引比率、他被引比率和普赖斯指数，从宏观层面分析ET领域中主要学科的跨学科发展模式；考察不同阶段内部及不同阶段之间的学科引证关系，探究不同阶段各学科在跨学科发展过程中的关系结构与角色演变；基于引文的中介中心度识别连接不同学科关系的重要文献，考察重要文献、高被引文献以及参考文献之间的引文关系，从微观层面揭示ET领域发展的具体演化路径。[结果/结论]ET领域发展经历潜伏期、发展期和成熟期三个阶段，并呈现独立型、交叉型和学习型三种学科发展模式；各学科之间的引证关系随阶段变化逐渐紧密且分布逐渐均匀，神经学、心理学和临床医学在跨学科发展和知识输出方面处于核心地位；ET领域纵向发展表现为独立型学科的基础理论创新，横向发展表现为3种类型学科的深度融合，并呈现出"独立-线性-网状"的发展路径。

关键词：引文分析 跨学科研究 发展模式 演化路径 眼动追踪
分类号：G203
DOI:10.13266/j.issn.0252-3116.2019.23.008

1 引言

学科是人类对知识的系统归类。随着科学系统的逐渐复杂化，致使诸多的社会问题和科学研究都无法依靠单一学科知识进行解决，跨学科研究成为现代科学创新发展不可或缺的模式[1]。跨学科的概念最早由美国心理学家R. S. Woodworth[2]在1926年提出，是指超越一个学科边界的"学科际"或"跨学科"研究活动，其本质是通过不同基础学科之间的交叉、渗透与融合，创造开发跨学科知识产品的特殊科研活动。与单一学科内部的纵深研究不同，跨学科研究更加侧重于横向发展，着重于与其他学科的高度交叉与融合，以解决不断深化的科学技术问题和社会问题，从而表现出不同的领域发展模式和交叉演化过程[3]。学科之间通过引证关联实现知识扩散，极大促进不同学科知识的协同、交叉、融合、发展与创新。因此，对跨学科领域中不同学科交叉现象与动态过程的分析，有助于深入揭示跨学科的形成、发展和演化规律，识别不同学科在领域发展中的作用及其演变，挖掘跨学科领域的发展模式与具体路径，进而为科学地保障跨学科的创新发展、合作研究与科研产出提供参考。

目前，对跨学科领域中发展模式与演化规律的研究主要是基于关键词演化[4-5]、主题相似度计算[6-7]、作者合著关系变迁[8-9]以及引文网络分析[10-11]等方法。其中，基于文献之间的引文关系是有效揭示跨学科领域中不同学科交叉关联与演化路径最为直接的表达[12]。为此，本文基于文献计量和引文网络分析方法，构建文献与学科层面的引文关系网络，从宏观、中

* 本文系国家自然科学基金青年项目"基于学术异质网络表示学习的知识群落发现"(项目编号：71804135)和中国博士后科学基金一等资助项目"融合语义与关系的科研社群识别与演化研究"(项目编号:2018M630885)研究成果之一。
作者简介：梁镇涛(ORCID：0000-0003-2927-3523)，硕士研究生；巴志超(ORCID：0000-0001-5626-5604)，讲师；徐健(ORCID：0000-0003-4886-4708)，副教授，通讯作者，E-mail：issxj@mail.sysu.edu.cn。
收稿日期:2019-04-24 修回日期:2019-08-01 本文起止页码:65-78 本文责任编辑:易飞

观和微观三个层面探究跨学科领域中的发展模式、各学科之间的关系结构与角色演变以及具体演化路径。另外,眼动追踪(Eye Tracking, ET)领域作为当前一个比较新兴的研究领域,侧重研究眼球凝视和运动轨迹的测量并应用于疾病治疗、认知机理和人机交互等研究领域中,主要涉及到心理学、神经学、临床医学、计算机科学和工程学等多个学科领域,是一个典型的跨学科研究领域[13]。因此,本文以眼动追踪领域作为跨学科研究对象,基于引文分析方法揭示该学科的发展模式与演化路径。

2 相关研究工作

跨学科研究作为愈发重要的现代科学创新研究范式和趋势,已吸引众多学者对其演化特征与规律进行探索。目前,针对跨学科的研究主要从跨学科基础研究、关键技术与方法研究以及跨学科知识挖掘三个角度进行探索[14]。其中,探究学科的"跨"学科发展过程与规律是跨学科知识挖掘的重要任务之一。为此,本文从基于引文分析的跨学科研究、跨学科领域中的发展模式与路径识别以及跨学科领域的演化特征分析三个方面对相关工作进行梳理。

2.1 基于引文分析的跨学科研究

参考文献反映一篇文章形成的知识基础,包含作者对前人概念、方法和技术等的吸收,而施引文献则反映被引文献对后续研究所产生的影响[15]。引文本身是对文献、期刊和学科之间知识流向最为直接的反映,引文分析能够对跨学科现象进行宏观到微观的探索,能够从知识扩散和交流角度深入分析跨学科研究中各学科的发展模式、关系结构和地位变化等,从而揭示出跨学科研究演化的本质特征,为理解和利用跨学科演化规律提供支持。

当前,针对跨学科引文分析可概括为两个方面:

(1)通过构建基于引文的跨学科测度指标体系,对文献所属学科的多样性、均匀度和差异度等方面进行度量。其中,基于多样性指标主要关注不同学科的数量和占比特征,认为当知识扩散涉及的学科越多时,其跨学科性就越强[16]。如 A. L. Porter 和 D. E. Chubin[17]提出经典的跨类别引文指标(Citations Outside Category, COC),计算来自其他学科的文献在该学科参考文献总量中的占比来衡量其跨学科性。T. Chakraborty[18]将施引文献纳入考虑范围,基于施引文献中其他学科文献所占的比重,提出施引文献多样性指数(Citation Diversity Index, CDI)。基于差异性的指标还主要关注学科之间的距离与相似性,认为当知识扩散所涉学科的差异性越大,则跨学科性越强。J. Wang 等[19]提出学科平均距离指标,通过参考文献中各学科间的平均相似度衡量领域的在差异性层面的跨学科度。基于均衡性指标关注不同学科知识分布平衡性,与信息熵概念相似,若某一学科有多个知识来源,知识来源分布越均衡,则其学科交叉程度越高,如基尼系数、赫芬达尔系数[20]等。此类指标主要应用于经济领域,用来衡量收入和产业结构的平衡性,后被引入到信息计量领域。上述指标中,以 COC 为代表的多样性指标计算简便且适用范围广。学科具备多样性是计算其差异性与均衡性的前提,其他两类指标是多样性指标的有益补充。(2)通过引文方法分析学科领域的跨学科特征,包括特定领域的知识来源分布[21]、学科之间引文滞后程度差异[22]、领域间影响关系[23]等。刘婷等[21]使用改进后的赫芬达尔系数对我国图书情报领域的跨学科知识输入进行量化,发现该领域知识输入主要集中于学科内部,而跨学科知识则主要来自计算机科学、经济学、法学与社会科学总论。E. J. Rinia 等[22]统计 1960–1992 年英、德两国 SCI 收录论文中各学科参考文献平均年龄及其占比,分析本学科以及跨学科引文在时滞上差异,发现学科内部引用参考文献的时滞要显著小于跨学科引用。K. Karunan 等[23]提出基于引文网络结构的跨学科知识贡献量化方法,并对生物能源技术和纳米能源技术领域进行实证分析,发现两个领域知识交流密切,前者对后者的知识贡献更为显著,并总结出跨学科知识贡献的五类网络结构模式。上述相关研究从来源、时间和方向角度对跨学科领域的静态特征进行定量分析,为后续研究提供了丰富的研究切入点,但较少关注跨学科领域的动态演化特征,而分析跨学科领域的形成、发展以及其中各学科的相互关系的动态变化具有重要意义。

2.2 跨学科领域中的发展模式与路径识别

探究跨学科领域形成和发展模式也越来越多地被相关学者关注。J. Xu 等[4]通过考察联合注意(Joint Attention)领域 1970–2014 年关键词在三个学科中先后出现的顺序、频次和占比等特征,探究该跨学科领域的发展模式,发现领域的发展最初诞生于某一学科内部,随着时间推移,参与的学科不断增加,最终形成比较成熟的跨学科领域,且在这一过程中存在着知识输出者、知识接收者以及二者混合的学科角色,并随时间动态变化。T. Chakraborty[18]采用参考文献和施引文献的学科多样性统计指标,对数据挖掘(Data Mining)

领域 1975-2010 年文献数据进行分析,发现该领域早期主要依赖于其他学科的知识,对外知识输出较少,而随着时间推移领域对外部学科的依赖性不断降低,知识输出不断提高,并由此归纳出跨学科领域"吸收-内化-输出"的发展模式。吕冬晴等[24]以我国人文社会科学学科为例,依据其跨学科知识吸收、内化和输出能力的不同,将 23 个学科的跨学科发展模式划分为内聚型、收敛型、平衡型和开放型 4 类,分别表现出低平、高平、剧烈波动和均衡波动 4 种发展特征。岳增慧等[25]以社会网络领域为例,对跨学科知识扩散的数量特征进行描述性统计,包括知识吸收和溢出的数量、强度和广度等指标。研究发现跨学科领域内的 4 类学科发展模式,得到的研究结论与吕冬晴等人[24]的研究比较相似。

上述研究主要从宏观层面对跨学科领域及其中参与学科的发展模式进行探索,有效识别跨学科领域的发展阶段和学科角色,但较少地结合微观分析对跨学科发展模式进行解释。为此,本文试图基于引文分析方法从宏观、中观和微观角度对跨学科领域动态演化过程中的发展模式、学科地位、知识泛化过程与文献引证特征进行分析,以期发现面向眼动追踪领域的发展模式与具体演化路径。

2.3 跨学科领域的演化特征分析

为更进一步揭示跨学科领域的发展模式,也需要对其微观的演化特征进行定量分析。针对跨学科领域演化特征的研究按照其分析对象的粒度可大致分为面向文献[26-28]、作者[29-32]与主题内容[33-34]三个角度。

其中,面向文献的跨学科演化特征分析主要基于科学计量方法统计特定领域文献的增长、老化情况 以及基于引文分析跨学科演化特征[26-27]。M. Coccia[26]利用指数模型对跨学科领域中各学科的文献增长情况进行拟合,发现跨学科领域的成果早期主要来自于少数的基础学科,后期由于应用型和新的子学科发展使得领域学科的交叉性得到不断增强。Y. W. Chang 和 M. H. Huang[27]从直接引用、文献耦合以及作者合著角度,观察 1978-2007 年图情领域的跨学科性及知识输入学科占比变化,发现图情领域参考文献的来源学科数量繁多,跨学科性逐年提高,但在文献耦合和作者合著的层面上显著地表现出更低的跨学科性。柯青和朱婷婷[28]利用 JCR 2007-2014 年图书情报学科的期刊引用数据,探究其知识来源的多样性和均衡性。发现图情领域的跨学科性较高但逐年变化较小,对其他学科的知识引用并没有稳定偏好,而社会学和管理学在某段时期存在较强的知识推进效应。

面向作者层面的跨学科研究主要基于作者合著关系[29-30]和作者研究兴趣相似性分析[31-32],通过分析作者关系和研究兴趣变迁情况反映跨学科领域结构和内容上的演化趋势。P. Liu 与 H. Xia[35]研究合作演化(Evolution of Cooperation)领域作者合作网络结构演化特征,发现合作网络结构随着时间演化逐渐由分散孤立变为局部社群,局部社群之间逐渐建立起连接,并随着网络连接密度的提高转化为"小世界"结构。关鹏等[36]利用 Author-Topic 主题模型分析锂离子电池领域作者研究兴趣的演化情况,发现核心作者的研究兴趣与该领域发展的主线存在着显著相关关系,核心作者的研究兴趣引领着领域研究主题的发展。

面向主题内容的研究则侧重以主题词为代表对跨学科领域进行主题演化分析[33-34]。隗玲等[33]提出学科主题创新的 6 种演化类型,并对情报学论文进行了实证分析,通过构造高频主题词共词矩阵,发现主题扩张、收缩和合并是该领域最普遍的演化路径。B. Chen 等[34]利用主题模型分析信息检索领域中的主题及其上下文变化,从中识别出稳定和易变的主题,并揭示了主题和上下文同时改变、主题改变而上下文不变、主题不变而上下文改变这几种主题演化模式。

综上所述,面向文献的跨学科演化特征研究在揭示跨学科领域的知识来源、学科关系演化等方面有较好的应用效果。而面向作者与主题内容的方法则能够反映跨学科领域演化的参与主体及内涵特征,有助于理解演化的动因与背景。其中,以基于概率主题模型的演化分析为代表,能够从文本中得到作者-主题、文档-主题的关系及其演化情况,但其输出主题仍需以人工的方式进行内容判别。

前人研究在方法指标和切入角度上提供了丰富的实践经验,但结合宏观和微观层面对跨学科领域发展模式进行定量分析的研究仍然较少。因此,在前人研究成果的基础上,本文提出跨学科发展模式与路径分析方法,在宏、中观层面探索跨学科领域中主要学科的发展模式以及学科之间的相互关系,微观层面分析文献引证关系,从而揭示跨学科领域的发展路径。

3 跨学科发展模式与路径分析方法

为探究一个跨学科领域随着时间演化的发展模式、各学科的关系与角色变化以及形成的具体发展路径,本文提出跨学科发展模式与路径分析方法,尝试从宏观、中观和微观三个层面探究跨学科领域演化特征。

在宏观层面,计算各阶段主要学科的他引比率、他被引比率以及普赖斯指数以反映学科依赖程度和更新速度,通过分析三种指标的变化趋势及在学科之间的测度差异,揭示该领域中不同类型的学科发展模式;在中观层面,基于目标文献内部的引文关系建立学科之间的引证关系网络,探究各阶段内部以及阶段之间的学科引证关系,通过分析不同阶段学科之间的关系结构和角色演变情况,探究跨学科领域发展的生命周期;在微观层面,构建基于高被引文献的引文关系网络,考察重要文献、高被引文献以及参考文献之间的引文关系,揭示学科之间具体的引证方式和动因,并探究跨学科领域中的知识流动与扩散形式,进而发现眼动追踪领域发展的具体演化路径,如图 1 所示。三个层次的分析结果相互关联和印证,从而有助于更加系统和全面地分析跨学科领域发展的演化特征。

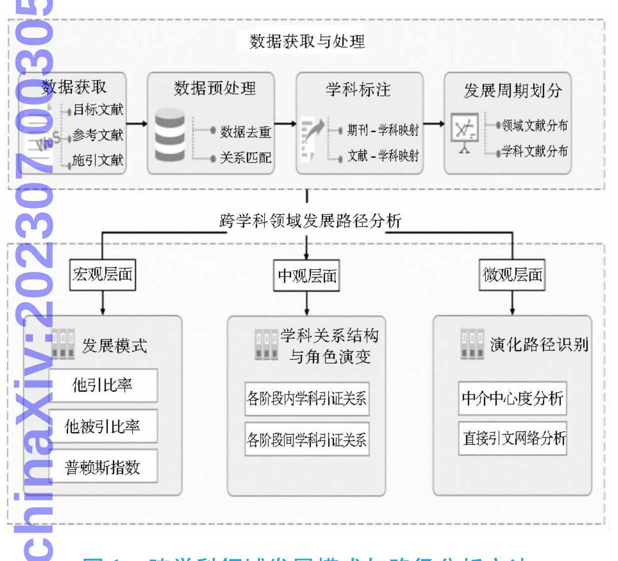


图 1　跨学科领域发展模式与路径分析方法

3.1　跨学科领域中学科发展模式分析

跨学科领域中的学科发展模式实质上是对领域内主要学科的跨学科性随时间变化趋势进行凝练和概括,通过借助相关的测量指标对跨学科性进行测度,从不同角度反映和提炼学科的发展模式。而一个学科在跨学科领域的发展模式可以通过该学科内外知识的利用数量和积极程度进行反映[18]。其中,学科内外知识的利用数量可以通过该学科相关文献的他引比率(Cross-Same Reference Ratio, CSRR)和他被引比率(Cross-Same Citation Ratio, CSCR)[18]进行描述,而知识利用的积极程度则可以利用普赖斯指数(Price's Index)[37]以及更细致的引文时滞[22]指标衡量。他引比率高表示该学科的知识比较依赖于其他学科,而他被引比率高表示该学科的知识广泛向其他学科输出,反之亦然。基于这两个比率的不同关系可概括出 4 种基本的学科类型:①他引比率低,且他被引比率低(低 - 低)的独立型学科,以学科内部的知识流动为主,表现较强的独立性;②他引比率高,而他被引比率低(高 - 低)的学习型学科,以广泛吸收领域中其他学科的知识为主,但自身输出能力尚未形成;③他引比率高,且他被引比率高(高 - 高)的交叉型学科,与其他学科知识交换关系密切,表现出较强的开放性;④他引比率低,他被引比率高(低 - 高)的输出型学科,主要依靠本学科的知识在领域内立足,并向其他学科广泛输出本学科知识。

为此,本文借鉴 T. Chakraborty 提出的参考文献的他引比率和施引文献的他被引比率方法[18],反映不同阶段学科之间的知识吸收和输出程度。他引比率(CSRR)计算方法如下:

$$ratio_{reference} = \sum_{article=1}^{j} \left(\frac{ExtRef_{article}}{IntRef_{article}} \times \frac{Ref_{article}}{Ref_{year}} \right) \quad \text{公式(1)}$$

其中,$article$ 为目标文献编号,$ExtRef_{article}$ 和 $IntRef_{article}$ 分别表示该目标文献的参考文献中归属其他学科与该学科的文献数量,$Ref_{article}$ 和 Ref_{year} 分别表示该目标文献与当前全部文献的参考文献数量。而他被引比率(CSCR)的计算方法与之类似。通过分析他引比率和他被引比率的变化趋势及其在学科之间的差异特征,能够揭示不同阶段中学科之间存在的依赖程度,进而提炼出该学科领域中不同学科的发展模式。

本文利用普赖斯指数(Price's Index)[37]和引文迟滞指标反映知识利用的积极程度。普赖斯指数是指某一学科领域内出版年限不超过 5 年的参考文献数量与参考文献总量的比值,用于衡量某一学科文献老化或更新的速度。当普赖斯指数越大时,说明该学科对新知识的吸收速度越快,反之亦然。该指数随着时间推移呈现逐渐变小趋势时表示该学科研究逐渐深入和进入成熟发展时期,计算公式如下:

$$P = \frac{\text{出版年限不超过 5 年的参考文献数} * 100\%}{\text{参考文献总数}} \quad \text{公式(2)}$$

引文迟滞指标[22]则通过计算学科参考本学科和其他学科的文献平均时间差异,细粒度描述学科参与跨学科领域的积极性及其随时间演化情况。某一学科从其他学科吸收知识的时滞越短,说明该学科的学习积极性越强。通过计算跨学科领域中各学科的普赖斯指数和引文迟滞程度,分析各学科中该指数的变化趋势及其学科之间的差异,可以从文献老化和更新的角

度有效揭示学科领域发展的动态过程以及学科之间发展的差异性,进而对跨学科领域中学科发展模式的发现进行补充。

3.2 学科间的引证关系分析

通过考察不同阶段内部以及不同阶段之间的学科引证关系,可以挖掘跨学科领域发展过程中各学科之间形成的关系结构与角色演变,进而揭示不同学科作用于跨学科领域发展所起到的功能与意义。为此,需要通过对所有目标文献内部的引文关系进行提取,并依据目标文献的引文关系投影出学科之间的引证关系以构建出学科引证网络,然后基于引文网络分析方法挖掘出不同阶段引证网络中的关键节点与边属性。其中,针对目标文献的学科标注是构建学科引证关系最为重要的步骤。目前主要有基于期刊分类系统和单篇论文属性两种方法[14]。前者主要根据期刊引用报告(Journal Citation Reports,JCR)或基本科学指标数据库(Essential Science Indicators,ESI)等一些成熟期刊分类体系对期刊进行类别标注,然后将期刊对应的文献划分到与期刊相同的学科类别中。后者则主要利用文献共被引情况、团队地址认同词等,基于学科占比进行投票确定,其本质上也是基于期刊分类系统。因此,本文使用基于期刊分类系统的学科标注方法进行处理。具体步骤包括:①编写 Python 爬虫程序获取跨学科领域中的目标文献集 D 及其施引文献集 S,基于唯一确定一篇文献的 WoS 入藏号字段建立两个集合直接的关系;②遍历所有关系获取两个集合中共同的文献集合 T,并依据相关的引文关系构建出文献层面的引文关系网络;③基于期刊分类系统和规则匹配方法对文献集合 T 中的每一篇文献进行学科属性标注,获取施引文献和被引文献所属的学科分类,进而将文献引文关系转换成其所属学科之间的引证关系,构建出学科之间的引证关系网络。该引证关系网络是有向加权网络,反映学科之间的引证关系,具有时间顺序上的连续性和结构上的单向无回路性,既可以通过可视化的形式观察学科之间知识的流向,也可以从路径识别、结构与内容特征三个方面挖掘学科发展的潜在规律。

3.3 文献间的引文关系分析

对跨学科领域中典型文献的引文关系网络进行分析,有助于从微观层面发现跨学科领域中知识流动与扩散的具体方式,揭示领域发展的演化路径。为此,本文获取目标文献中被引量最高的 Top-N 篇文献,根据这些文献及其参考文献的直接引证关系构造引文网络,然后基于引文的中介中心度识别不同阶段以及不同学科之间处于连通位置的重要文献,揭示其归属的学科以及与其关联的文献群所属学科之间的区别与联系,并观察这种区别与联系在时间维度上的变化情况,从而发现该领域知识泛化的规律。

中介中心性(Betweenness Centrality)是指网络中经过某点并连接这两点的最短路径占这两点之间的最短路径线总数的比值[38]。中介中心性高的节点往往位于连接两个不同聚类的路径上,其所处的地位相当于跨越社群的桥梁或是看门人角色,拥有传递甚至修改群体之间信息的特权,因此具有优势地位。通过发现跨学科领域中处于中介位置上的文献,一方面可以检验其是否通过获得额外被引量或者其他方面的优势而"受益";另一方面又可以考察学科之间间接的知识流动关系。计算公式如下:

$$C_B(i) = \sum_{j \neq k} \frac{P_{jk}(i)}{P_{jk}} \quad \text{公式(3)}$$

其中,$C_B(i)$为节点 i 的中介中心度,j 和 k 为网络中一对其他节点,P_{jk}表示节点 j 和 k 之间的最短路径数,$P_{jk}(i)$表示 j 和 k 之间的最短路径中经过 i 的数量。

4 实证分析

4.1 数据获取与处理

眼动跟踪(Eye Tracking,ET)是度量凝视点或测量眼球运动的过程,通过利用眼动跟踪监视器记录和标识眼球运动的轨迹及活跃区域,以了解人对外在事物理解的主观意愿[13],其研究内容包括快速眼动睡眠[39]、眼球运动机理[40]、疾病治疗[41]、人机交互[42]和机器人研发[43]等,涉及到心理学、神经学、临床医学、计算机科学和工程学等众多学科,是一个典型的跨学科研究领域。随着科技水平的进步,眼动追踪技术已经在人机交互、交通行驶、人因分析、疾病治疗、建筑选址等领域得到广泛使用,具有宽广的应用前景。因此,本文选择眼动跟踪领域作为跨学科研究的对象,采用关键词共现和引文分析方法对该领域的知识扩散演化特征进行分析。以 TS = "eye tracking" OR TS = "eye movement" OR TS = "gaze tracking" OR TS = "eye gaze"作为检索式,基于 Web of Science 核心合集作为数据源获取 1900－2016 年的所有相关文献,并利用自编 Python 爬虫程序获取相关文献的所有施引文献。最终经过去重处理后获得该领域相关目标文献 31 008 篇、参考文献 1 281 725 篇和施引文献 672 993 篇。

尽管目标文献和施引文献的原始数据格式中都存在 WoS 类别字段(WC),但由于 WoS 将学科类别划分

为 251 类,使得同一篇文献可能具有多种类别,导致无法直接采用该字段进行学科标注。因此,本文使用 ESI 期刊分类作为学科标注依据,将原始数据中的出版物名称字段(SO)与 ESI 期刊列表进行对照,然后根据该列表确定出版物的学科属性,而文献的学科和其发表的出版物学科相同。ESI 期刊列表共有 11 491 种期刊,分为 22 个类别,如表 1 所示。

表 1 ESI 学科类别名称对照

编号	学科简称	学科全称	中文名称
1	BBI	BIOLOGY & BIOCHEMISTRY	生物学
2	CLM	CLINICAL MEDICINE	临床医学
3	CPS	COMPUTER SCIENCE	计算机科学
4	ENG	ENGINEERING	工程学
5	MAT	MATHEMATICS	数学
6	MIC	MICROBIOLOGY	微生物学
7	NEB	NEUROSCIENCE & BEHAVIOR	神经学
8	PSS	PSYCHIATRY/PSYCHOLOGY	心理学
9	SSS	SOCIAL SCIENCES, GENERAL	社会科学
…	…	…	…
22	SPA	SPACE SCIENCE	空间科学

其中,31 008 篇目标文献中有 6 188 篇因其对应的出版物不在 ESI 期刊列表中而无法匹配到学科,约占全部目标文献的 20%。类似地,672 993 条施引文献记录中有 66 608 条(10%)、1 281 725 条参考文献记录中有 352 985 条(28%)无法匹配到学科。为此,对于目标文献和施引文献,本文根据已成功匹配到类别的记录中研究方向字段(SC),建立其与类别之间的联系形成补充的匹配规则,根据此规则对未归类文献重新进行学科匹配。通过检查剩余文献的研究方向字段,将这些文献归属到概率最大的学科类别中。最后对仍无法进行学科归类的目标文献(1 681 条)和施引文献(7 778 条)进行手工标注,最终得到有效的目标文献 31 008 条、施引文献 665 215 条和参考文献 928 740 条。通过学科标注发现该跨学科领域主要涉及到神经学(NEB)、心理学(PSS)、临床医学(CLM)、生物学(BBI)、工程学(ENG)、计算机科学(CPS)与社会科学(SSS)7 个学科。

为进一步对 ET 领域的发展阶段进行周期划分,针对目标文献与各学科文献的数量分布情况进行统计,如图 2 所示。对照 ET 领域目标文献(a)和主要学科(b)的数量分布与增速变化情况,可将 ET 领域发展周期大致划分为 4 大阶段:①领域潜伏期(1900 – 1967 年):发文量一直处于较低水平,且仅有神经学和心理学两学科发文;②发展期(1967 – 1993 年):文献数量缓慢增长,主要学科的文献发文量逐渐地增加;③成熟期 – I(1994 – 2007 年):总文献数量以及各学科的发文量明显增长;④成熟期 – II(2008 – 2016 年):文献数量呈现指数增长趋势,其中,计算机科学和工程学相关文献数大幅攀升。

4.2 ET 领域中的发展模式分析

为揭示 ET 领域中主要学科的跨学科发展模式,计算神经学(NEB)、心理学(PSS)、计算机科学(CPS)与工程学(SSS)学科中参考文献的他引比率(CSRR)和施引文献的他被引比率(CSCR)并绘制两个指标随时间的变化情况,如图 3 所示。选择这 4 个学科的主要原因是其发文量相对其他学科较大,能够更加明显地体现出学科发展的趋势。另外,他引比率的上升或下降表明该学科随着时间推移对其他学科知识吸收程度的提高或降低,而他被引比率的上升或下降表明该学科随着时间推移对其他学科知识输出程度的提高或降低。从图 3 中可以看出 ET 领域主要存在着 3 类学科发展模式:①独立型学科:以神经学为代表,他引比率和他被引率都维持在 1 以下的水平,说明该类型学科知识的来源和输出主要基本来自本学科;②交叉型学科:以心理学为代表,他引比率和他被引率都长期高于 1,说明该类型学科的知识来源比较广泛,而本学科知识在知识来源中占比不高,却积极地向其他学科输出知识;③学习型学科:以计算机科学和工程学为代表,此类型学科对于其他学科的知识依赖性较强,因此他引比率明显高于他被引率,说明知识的来源主要是其他学科知识,而知识输出以本学科为主。通过对 ET 领域中其他学科进行分析发现都可归并到这 3 种发展模式,而并未发现输出型学科。

另外,从时间维度看,各类型学科因为早期某些年份文献发文量较少,导致两种指标的波动较大。而随着时间的推移,独立型学科的两个比率都逐渐提高,表明其在领域中的参与度逐渐增强。而交叉型学科的两个指标则逐渐平稳,说明其在跨学科领域中找到较为稳定的位置,得到其他学科的认可。学习型学科进入该领域的时间比较晚,两个指标的变动随着时间推移差距逐渐拉大,说明此类型学科仍然依赖于其他学科知识进行发展,其产出也主要为本学科所吸收。

为进一步考察各学科对领域知识吸收的积极程度,分析 ET 领域中主要学科的普赖斯指数并对参考文献进行内外学科区分,如表 2 所示。普赖斯指数越大,说明该学科在 ET 领域中对新知识的需求和吸收速度越快,参与积极度越高,学科更新速度也越快。从总体

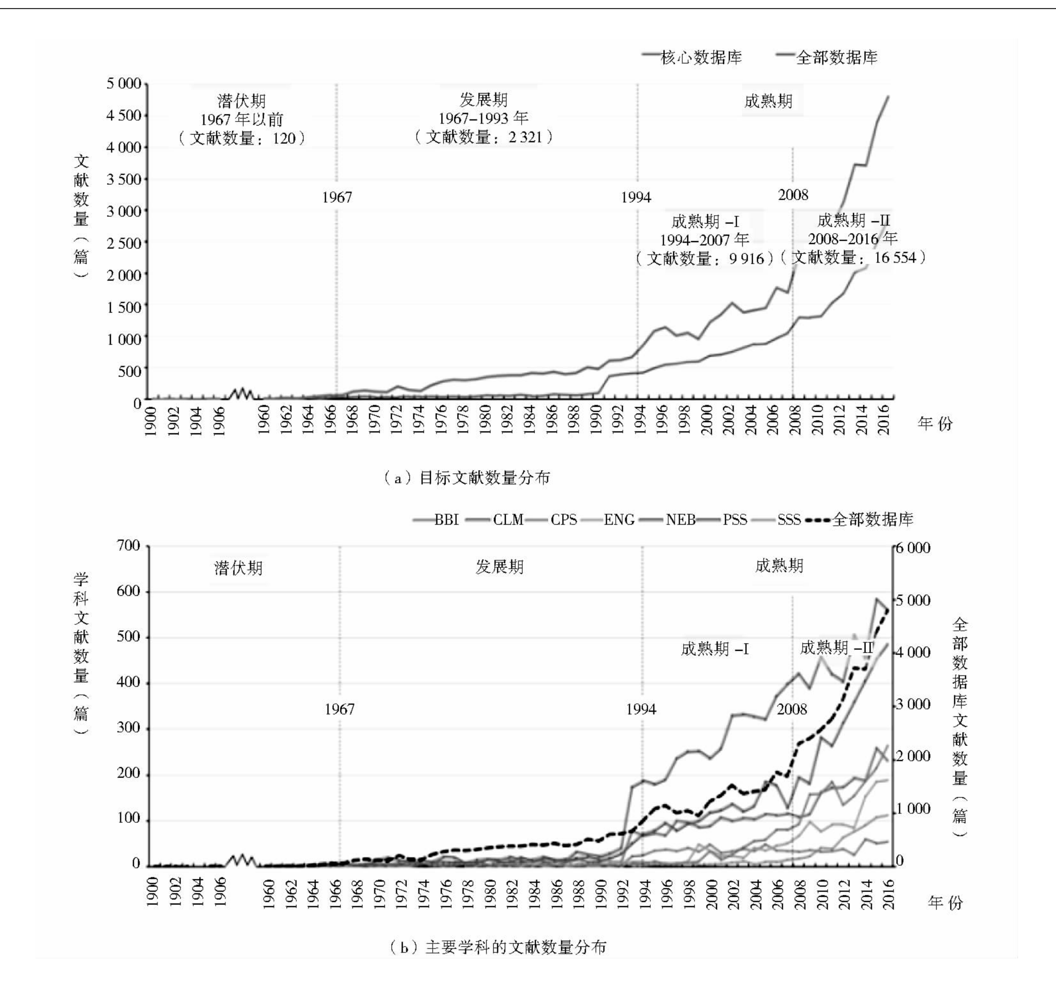


图 2　ET 领域发展的周期阶段

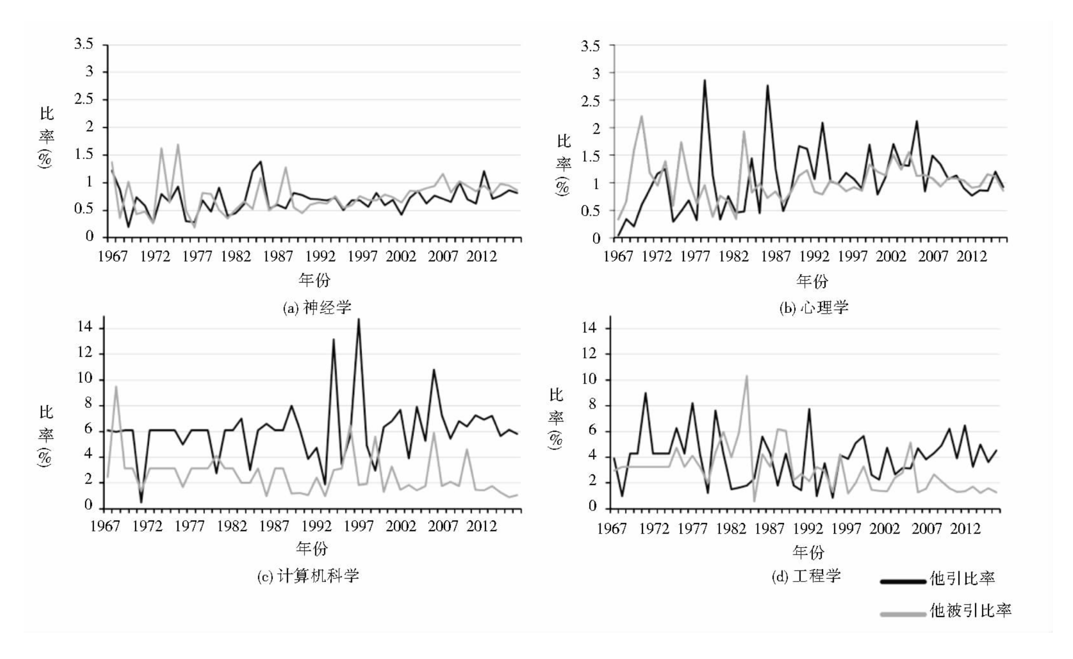


图 3　ET 领域主要学科的他引/他被引比率变动情况

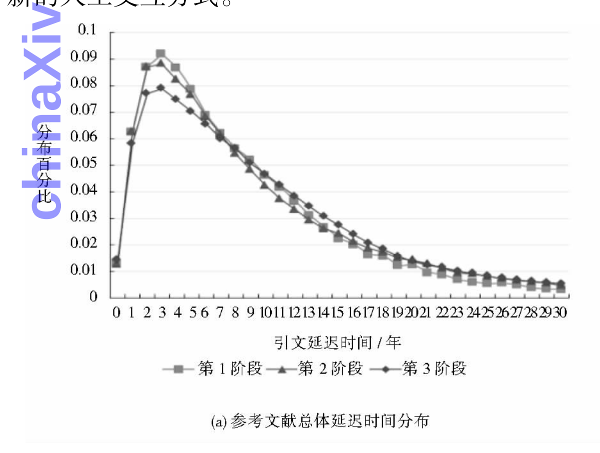
上看，ET 领域的普赖斯指数随着时间变化由 34 降低为 30，表明领域从快速发展阶段步入到成熟平缓阶段。而从不同学科看，不同学科的文献老化情况有所不同。神经学、心理学和生物学在本领域中发展较早且具有较高的地位，其普赖斯指数随时间推移逐渐降低，5 年内的参考文献占比和相对排名都有较大下跌。

表 2 ET 领域主要学科的普赖斯指数变动情况

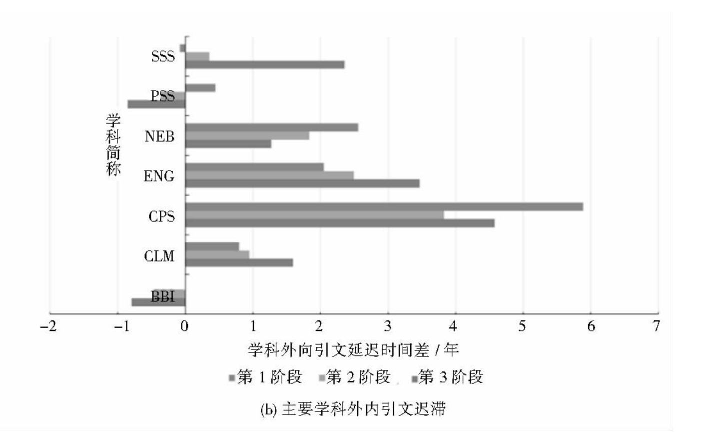
学科简称	第 1 阶段				第 2 阶段				第 3 阶段			
	本学科(%)	外学科(%)	总计(%)	排名	本学科(%)	外学科(%)	总计(%)	排名	本学科(%)	外学科(%)	总计(%)	排名
BBI	13	23	36	1	9	28	36	1	5	24	29	5↓
PSS	20	14	34	2	20	14	34	2	17	12	29	5↓
NEB	24	10	34	2	23	10	33	4↓	20	11	31	3↑
ENG	11	21	31	4	11	19	30	7↓	14	20	34	1↑
CLM	14	16	31	4	14	17	31	5↓	13	18	31	3↑
SSS	4	24	28	6	4	27	31	5↑	10	17	27	7↓
CPS	5	22	27	7	6	28	34	2↑	9	23	32	2
总计	20	14	34	–	19	15	34	–	15	15	30	–

同时这些学科的参考文献数量逐渐增加，说明学科在领域发展后期更需要结合其他学科的知识进行发展创新。相反，计算机科学和工程学科的普赖斯指数逐渐增加，5 年内参考文献比例呈现上升趋势，其相对排名迅速上升。其中，本学科参考文献的增幅要大于其他学科，而其他学科的普赖斯指数大于本学科，这说明 ET 领域中比较活跃的学科在不同阶段都在不断变动，工程学、计算机科学在最新阶段表现十分活跃，但尚仍未动摇神经学和心理学在 ET 领域中的地位。从目标文献的研究主题内容来看，这两个学科近年来发表的主题较多集中于机器人、虚拟现实等方面，说明相关研究开始注重将眼球跟踪应用于这些方向以提供一种全新的人工交互方式。

另外，通过统计 4 个学科中来自本学科以及其他学科参考文献的发文时间，计算其延迟时间分布情况，如图 4 所示。参考文献的延迟时间是指一篇文献的发表时间与其所参考文献发表时间的差值。图 4(a) 显示了 ET 领域中参考文献延迟时间的分布情况，从中可以看出在不同阶段延迟时间的分布特征基本保持一致，都侧重引用近 5 年内的参考文献，且引用第 3–4 年内的文献最多，随着年份的增加占比逐渐减少。通过纵向对比 3 个阶段延迟分布的差异发现在 5 年内的占比随着阶段变化而逐渐下降，这一现象也表明 ET 领域发展逐渐成熟且理论逐步得到完善，早期研究的成果也越来越多地被现有研究所认可。



(a) 参考文献总体延迟时间分布



(b) 主要学科外内引文迟滞

图 4 ET 领域的引文迟滞性分析

图 4(b) 显示 ET 领域主要学科的外内引文迟滞指标在不同阶段的变动情况。该值主要通过计算学科外引文迟滞（目标文献发表年份减去引用的其他学科文献发表年份的平均值）与本学科引文迟滞（目标文献发表年份减去引用的本学科文献发表年份的平均值）之间的差值获得。该值主要反映知识在学科内外传播速度的差异性。当该值大于 0 时，即本学科外的引文迟滞大于学科内的引文迟滞值，表明知识在学科内的传播速度大于在学科外的传播速度。从图中可以看出对于神经学、工程学、计算机科学和临床医学而言，来自于本学科的知识传播速度都要比学科外的知识传播速度快，心理学和生物学在第二和第三阶段的知识传播情况则正好相反。通过观察不同学科引文迟滞在各阶段的变化发现心理学、神经学、计算机科学和生物学的外内引文迟滞都在逐渐变小，说明这些学科在吸收其他学科的知识上都较为积极，引用其他学科的文献

越来越新。而临床医学、工程学和社会科学的外内引文迟滞则不断增大，其引用本学科的参考文献相对更新，而引用其他学科的相对更老，说明这些学科在吸收其他学科的知识上都较为消极。

综上所述，通过对 ET 领域的他引比率、他被引比率以及引文迟滞分析研究 ET 领域中各学科的发展类型与积极程度，发现学科主要存在 4 种类型的发展模式，而在 ET 领域中主要呈现出独立型、交叉型和学习型三种学科发展模式，且独立型和交叉型的普赖斯指数和学科外内引文迟滞逐渐缩小，说明随着时间的演化对其他学科知识吸收的积极程度逐渐降低，而学习型的普赖斯指数和学科外内引文迟滞逐渐增加，说明对其他学科知识吸收的积极程度逐渐增加。

4.3 ET 领域中学科关系与演化分析

根据目标文献内部的引文关系投影出各学科之间的引证关系，并使用 Gephi 软件可视化分析 ET 领域中各学科在不同阶段文献数量分布与其内部引证关系的相对变化情况，如图 5 所示。由于图像重叠的原因，去除了学科自身引证的自环连接。其中，边的颜色表示学科来源，节点大小和边的粗细表示学科文献数量和学科之间引证关系的大小。从图中可以看出，在第一阶段，ET 领域研究基础学科主要是神经学，其次是心理学和临床医学。在学科引证关系上，处于网络中心地位的神经学被 ET 领域内其他各个学科引证，而神经学自身引证较多的是心理学，此外对临床医学与生物学等学科也有较明显的引证关系，其余学科的引用关系则不够明显，这一时期的引证关系网络也相对比较稀疏。在第二阶段，学科之间的引证关系增长明显，部分新加入学科的发文量逐渐增加，如社会科学、工程学和计算机科学等。心理学在本时期对神经学的引证数量超过神经学对本学科的引证数，且神经学对其他学科的引证分布也逐渐变得均匀。各个学科都非常积极地向其他学科吸取知识，网络中的连接情况变得更为密集。在第三阶段，心理学科的地位逐渐逼近长期处于核心地位的神经学科，其主要得益于信息技术、人机交互理论的发展，使得计算机科学与工程学的地位获得较大提升，而临床医学在三个阶段的地位基本上未发生太大变化。另外，社会科学、计算机科学与工程学这三个学科有明显的地位提升，属于神经学和医学领域的理论与方法也逐渐被应用到系统优化设计和提升用户体验方面，其研究成果又被其他学科引证，并反作用于这些领域研究的发展。

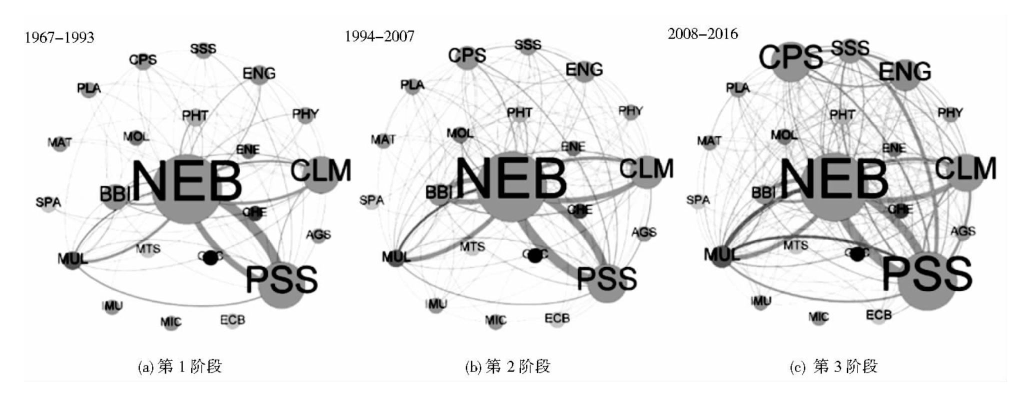


图 5　不同阶段内部学科之间的引证关系

从总体上讲，学科之间的引证关系随着阶段演化变得更加频繁和均匀，且在不同阶段存在着多对关系密切的学科组合，这些组合之间的引证关系相对更为频繁。如在前两个阶段的神经学和心理学、神经学和生物学，第三阶段中的计算机科学和工程学、社会科学和心理学。ET 领域中各学科随着时间推移发展逐渐成熟，其主要表现在累积发文量达到较高水平；学科研究更具有独立性，都保持着相对较低地被其他学科引证及引证其他学科的比例，即大部分引证都来自或指向本学科。

为进一步分析不同阶段之间学科引证关系情况，基于桑基图探究目标文献在三个阶段之间的学科引证关系，如图 6 所示。每个阶段的节点表示一个学科，节点的纵向长度表示学科在该阶段的文献被引次数，纵向长度越长表示被引次数越多，也说明该学科在这一时期具有更多的贡献与较高的地位。一个阶段到下一个阶段的流向则表示学科之间的引证关系，流向下一阶段的相同节点表示被下一阶段同学科的文献所引证，反之则是被相应的其他学科所引证。通过桑基图可以揭示三个阶段之间学科引证的流向特征，发现不同学科在三个阶段对本学科以及其他学科的输入与输出性变化。从图中可以看出阶段之间的学科引证关系

在整体上呈现一个从左到右不断变宽的喇叭形状，由于在第一阶段发表的文献较少，各学科被引次数与第二、三阶段存在明显的差异。在第一阶段中，可直观地发现被第二阶段文献所主要引用的学科为神经学、心理学、临床医学和生物学。其中，第一阶段的神经学有 70.78%（29.22%）的引用主要来自第二阶段中的本学科（其他学科），其余三个学科依次对应的比例为：心理学 62.16%（37.84%）、临床医学 42.57%（57.43%）和生物学 31.46%（68.54%）。尽管神经学和心理学作为 ET 领域中的强势学科在输出比例上相对低于其他新兴学科，但是其作为该领域内的中心学科几乎被其他所有学科所引用，从数量上也高于新兴学科。而且新兴学科的高输出性和输入性往往是因为其理论尚未成熟，来自本学科引用相对贫瘠，只有当两个比例保持在一个中等偏下水平时才能够说明一个学科在跨学科领域中逐渐成熟。在第二、三阶段之间，神经学仍主要被本学科文献所引用，但占比相较于第一与二阶段之间有所降低（从 70.78% 到 59.02%），且来自于其他学科的引用相对增加。类似现象也发生在心理学（从 62.16% 到 55.91%）、临床医学（从 42.57% 到 38.78%）、生物学（从 31.46% 到 18.26%）、计算机科学（从 49.08% 到 40.11%）。这一现象表明上述学科的跨学科性逐渐提高，在 ET 领域研究中各学科之间充分融合。

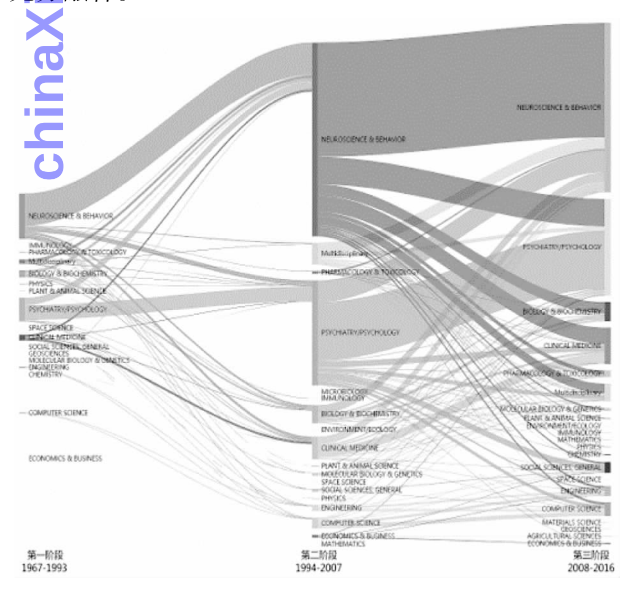


图 6　不同阶段之间的学科引证关系

4.4　ET 领域发展的演化路径分析

为探究不同阶段学科之间引证关系的演化路径，使用 Pajek 软件计算 ET 领域中在各个阶段被引量位于前 500 的 1 500 篇文献的中介中心度，并使用 Gephi 软件进行可视化，如图 7 所示。图中节点的颜色主要根据其归属的学科类别确定，中介中心度较高的文献节点直径较大，表示该节点处于联系其他文献的重要位置上。其往往处于学科社群的边缘，辅助学科社群中的节点吸收和传播知识。在第一阶段，左上方是文献 27040 所在的心理学社群，而神经学较为均匀地分布在网络各个位置。中介中心度最高的是心理学科的文献 27040，其联系着心理学和神经学社群，而其他中介中心度较高的节点则属于神经学科，可以看出这一阶段中起到中介作用的文献仍主要来自于本学科内。在第二阶段出现 4 个密集的社群，本阶段中介中心度较高的文献主要发表在属于多学科的期刊中（如文献 28287、21053 等），说明 ET 领域知识的泛化程度逐渐提高，有利于更多相关学科了解领域知识并加入到该领域研究中。在第三阶段网络中节点之间的边分布较前两个阶段都相对更加均衡，属于第三方学科的中介节点占据重要位置，生物学文献 6662 和 8126 是沟通神经学内部最重要的节点，表明这一阶段 ET 领域中各个学科之间的知识流动更为自由，学科壁垒逐渐被打破。综上所述，起中介作用的文献最初与文献社群的学科相同，随后逐渐演变为多学科乃至其他学科的文献，表明随时间推移 ET 领域知识泛化的程度不断提高，学科之间沟通阻碍减少。其原因可总结为外部和内部两方面：一是随着领域的扩大和参与学科的增多，其他学科知识对本学科的发展愈发重要；二是 ET 领域跨学科性逐渐增强，发表在多学科甚至其他学科期刊上时使相关研究者更多地关注，从而促使科研人员发表和引用跨学科文献。

为进一步发现 ET 领域发展的演化路径，借 T. Munoz-Ecija 等[5]探究纳米技术发展演化路径的方法，采用 CitNetExplorer 工具[44]对整个数据集被引量最高的前 200 篇文献进行可视化分析，如图 8 所示。通过对引证路径进行聚类，可将文献集划分为 4 个类别，且各类别之间存在着较多交叉联系。其中，从左到右类别的主要内容分别是：关于眼球视觉机理和认知方面研究、人脸识别研究、骤醒和嗜睡研究、REM 睡眠及其对记忆力、认知等方面影响研究。从整体路径走势可以看出 ET 领域在上个世纪 50 年代发表第一篇论文，主要研究眼球视觉的机理，并且在 60 年代针对该问题产生了一次研究成果的小爆发。七八十年代产生了更多研究 ET 领域中不同问题的相关论文，这些论文逐渐将所研究问题带入科研主视角，并在 90 年代后激发了大量相关研究产生。另外，在各类别中都存在不同程

度的“睡美人”现象，有一篇或多篇发表时间较早，发表后在很长一段时间未被关注，但却为后续的相关研究爆发提供了重要基础。在1990年以后，高被引文章数量激增，研究不同问题的论文相互之间也产生了较多联系。发表较早的核心论文共同被研究新问题的核心论文所引证，这一时期研究不同问题的论文之间相互引证或发生文献耦合，共同引证相同的早期文献。这种引证关系说明眼动追踪成为各个学科共同关注的问题或是解决本学科难题的一种新思路。

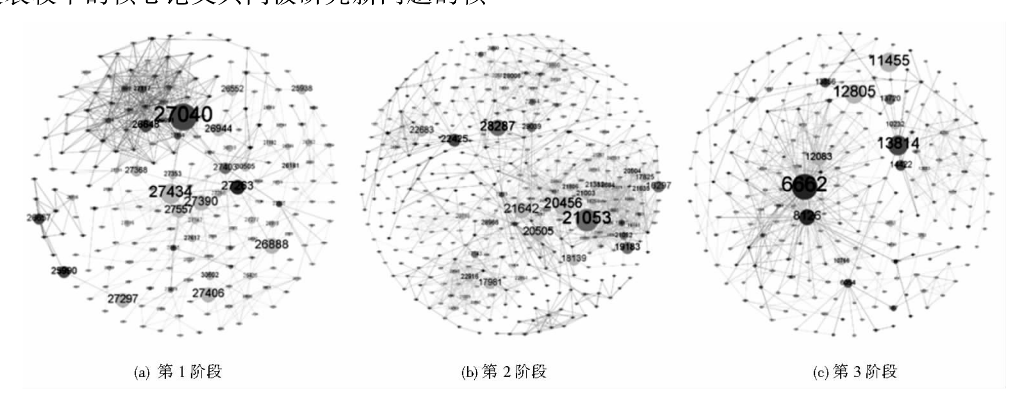


图7　不同阶段高被引文献之间的引文网络

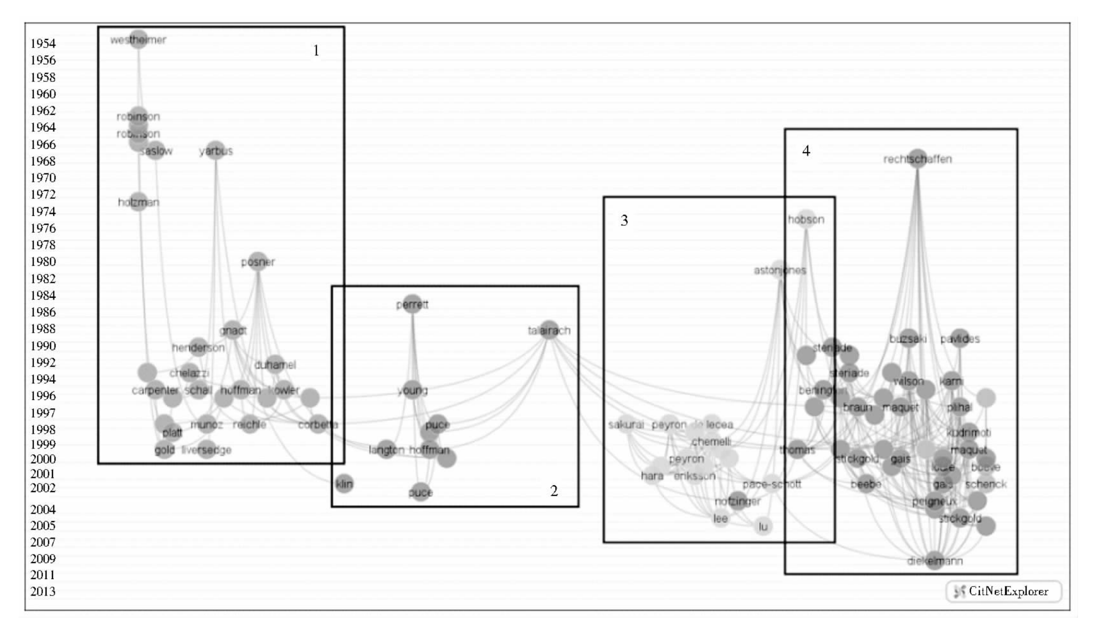


图8　高被引文献之间的引文路径分析

综上所述，ET领域在纵向和横向两个方向上的研究方向和参与学科多样性都比较丰富，纵向主要表现为神经学、临床医学等独立型学科在基础理论不同方向的创新研究，核心的基础理论包括眼动模式、脑成像方法和人脸识别机理等。横向上表现为随着时间演变强势学科不断结合学科内以及其他学科的热点问题，交叉型和学习型学科如心理学、工程学、社会科学等在吸收独立型学科的基础理论后逐渐加入到ET领域研究中，眼动模式、脑成像观察、心理类疾病和社交理论研究的融合是该发展特征的具体表现。此外，在演化结构方面，ET领域早期的研究发展模式主要是由独立型学科主导的线型模式，研究相对较为地独立；而到中后期发展模式则转变为网状，研究内容表现为独立型、交叉型和学习型学科的相互融合，学科之间的合作和依赖程度逐渐提升。

5　结论与展望

当前，针对跨学科活动进行的研究尚未建立统一的发展模式测度体系。在前人的基础上，本文创新地提出了跨学科领域发展模式与路径分析方法，能够从宏观、中观和微观3个层面对跨学科领域动态演化过程中的发展模式、学科地位、知识泛化过程与文献引证

特征进行较为全面的分析。本文以眼动跟踪(ET)跨学科领域为例,应用跨学科领域发展模式与路径分析方法,挖掘该领域的发展模式与具体演化路径。通过分析不同阶段各个学科的他引比率、他被引比率以及普赖斯指数的变化趋势及在学科之间的差异,提炼 ET 领域中存在的学科发展模式。分析各阶段内部以及阶段之间的学科引证关系,探究学科之间的关系结构和角色演变过程。通过考察重要文献、高被引文献以及参考文献之间的引文关系,发现 ET 领域发展的具体演化路径。实验结果表明:ET 领域发展分为潜伏期、发展期和成熟期 3 个时期,成熟期又可进一步划分两个阶段。根据不同学科吸收、输出知识的数量和积极程度的差异,ET 领域中存在 3 种类型的学科发展模式:知识来源和输出对象以本学科为主的独立型学科;知识来源和输出对象涉及众多学科的交叉型学科;广泛吸收其他学科知识并将知识在本学科中内化的学习型学科。各学科间的引证关系随阶段变化逐渐紧密和分布均匀,神经学、心理学和临床医学在跨学科发展和知识输出方面处于核心地位;ET 领域纵向发展表现为独立型学科的基础理论创新,横向发展表现为 3 种类型学科的深度融合,并呈现出"独立 - 线性 - 网状"的发展路径。

本文研究也存在一定局限性,由于当前文献学科属性标注并没有统一、公认的方法,而学科标注是开展跨学科测度研究的关键步骤,其划分准确性直接影响后续分类结果。本文仅采用 ESI 期刊类别确定文献学科类型,并对剩余文献结合其研究方向进行自动和手工结合的方式进行处理。另外,现有针对跨学科发展模式研究并没有统一的测度体系,本文通过三个指标从不同角度归纳领域中的发展模式,后续需寻找更合适的指标从不同角度对发展模式的揭示进行有效补充。未来也需要综合考虑作者、引文、主题等角度对跨学科演化特征进行分析,实现从各个角度相互关联与验证,以揭示跨学科发展的普适性规律。

参考文献:

[1] RHOTEN D. Risks and rewards of an interdisciplinary research path[J]. Science, 2004,306(5704):2046.
[2] 刘仲林. 交叉科学时代的交叉研究[J]. 科学学研究, 1993(2):11 - 18.
[3] 张琳. 国内外"交叉科学"研究现状及评述[J]. 科技管理研究, 2013,33(12):251 - 254.
[4] XU J, BU Y, DING Y, et al. Understanding the formation of interdisciplinary research from the perspective of keyword evolution: a case study on joint attention[J]. Scientometrics, 2018,117(2):973 - 995.
[5] MUNOZ-ECIJA T, VARGAS-QUESADA B, CHINCHILLA - RODRIGUEZ Z. Identification and visualization of the intellectual structure and the main research lines in nanoscience and nanotechnology at the worldwide level[J]. Journal of nanoparticle research, 2017,19(2):62 - 87.
[6] ZUO Z, ZHAO K. The more multidisciplinary the better? - the prevalence and interdisciplinarity of research collaborations in multidisciplinary institutions[J]. Journal of informetrics, 2018,12(3):736 - 756.
[7] FIGUEROLA C G, GARCÍA MARCO F J, MARÍA PINTO. Mapping the evolution of library and information science (1978 - 2014) using topic modeling on LISA[J]. Scientometrics, 2017,112(3):1507 - 1535.
[8] ZHANG L, SUN B, CHINCHILLA-RODRÍGUEZ Z, et al. Interdisciplinarity and collaboration: on the relationship between disciplinary diversity in departmental affiliations and reference lists[J]. Scientometrics, 2018,117(1):271 - 291.
[9] KARLOVČEC M, MLADENIĆ D. Interdisciplinarity of scientific fields and its evolution based on graph of project collaboration and co-authoring[J]. Scientometrics, 2015,102(1):433 - 454.
[10] 张勤. 国内知识管理领域跨学科知识交流特征研究[J]. 图书情报知识, 2018(6):50 - 60.
[11] 杨瑞仙, 姜小函. 从学科和期刊的引证视角看交叉学科的知识结构和演化问题——以图书情报学科为例的实证研究[J]. 图书情报工作, 2018,62(5):30 - 39.
[12] PORTER A L, COHEN A S, DAVID ROESSNER J, et al. Measuring researcher interdisciplinarity[J]. Scientometrics, 2007,72(1):117 - 147.
[13] MORIMOTO C H, MIMICA M R M. Eye gaze tracking techniques for interactive applications[J]. Computer vision and image understanding, 2005,98(1):4 - 24.
[14] 章成志, 吴小兰. 跨学科研究综述[J]. 情报学报, 2017,36(5):523 - 535.
[15] GARFIELD E. Citation indexing for studying science[J]. Nature, 1970,227(5259):133 - 138.
[16] WAGNER C S, ROESSNER J D, BOBB K, et al. Approaches to understanding and measuring interdisciplinary scientific research (IDR): a review of the literature[J]. Journal of informetrics, 2011,5(1):14 - 26.
[17] PORTER A L, CHUBIN D E. An indicator of cross - disciplinary research[J]. Scientometrics, 1985, 8(3): 161 - 176.
[18] CHAKRABORTY T. Role of interdisciplinarity in computer sciences: quantification, impact and life trajectory[J]. Scientometrics, 2018,114(3):1011 - 1029.
[19] WANG J, THIJS B, GLÄNZEL W. Interdisciplinarity and impact: distinct effects of variety, balance, and disparity[J]. Plos One, 2015,10(5):e127298.
[20] 黄颖, 张琳, 孙蓓蓓, 等. 跨学科的三维测度——外部知识融

合、内在知识会聚与科学合作模式[J]. 科学学研究, 2019, 37(1):25－35.

[21] 刘婷, 李长玲, 刘运梅, 等. 基于参考文献分类号的图书情报学跨学科知识输入特点分析[J]. 情报科学, 2018,36(10):99－104.

[22] RINIA E J, VAN LEEUWEN T N, BRUINS E E W, et al. Citation delay in interdisciplinary knowledge exchange [J]. Scientometrics, 2001,51(1):293－309.

[23] KARUNAN K, LATHABAI H H, PRABHAKARAN T. Discovering interdisciplinary interactions between two research fields using citation networks[J]. Scientometrics, 2017, 113(1):335－367.

[24] 吕冬晴, 谢娟, 成颖, 等. 我国人文社会科学间跨学科模式研究[J]. 图书情报知识, 2018(6):37－49.

[25] 岳增慧, 许海云. 学科引证网络知识扩散特征研究[J]. 情报学报, 2019,38(1):1－12.

[26] COCCIA M. General properties of the evolution of research fields: a scientometric study of human microbiome, evolutionary robotics and astrobiology[J]. Scientometrics, 2018,117(2):1265－1283.

[27] CHANG Y W, HUANG M H. A study of the evolution of interdisciplinarity in library and information science: using three bibliometric methods[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2012,63(1):22－33.

[28] 柯青, 朱婷婷. 图书情报学跨学科期刊引用及知识贡献推进效应－基于 JCR 社会科学版的分析[J]. 情报资料工作, 2017(2):12－21.

[29] SUN X, DING K, LIN Y. Mapping the evolution of scientific fields based on cross-field authors[J]. Journal of informetrics, 2016,10(3):750－761.

[30] KUMAR S, MARKSCHEFFEL B. Bonded-communities in HantaVirus research: a research collaboration network (RCN) analysis [J]. Scientometrics, 2016, 109(1): 533 －550.

[31] 史庆伟, 乔晓东, 徐硕, 等. 作者主题演化模型及其在研究兴趣演化分析中的应用[J]. 情报学报, 2013,32(9):912－919.

[32] 何劲, 关鹏, 王曰芬. 作者－主题关联的学科知识网络构建与演化分析[J]. 情报科学, 2019,37(1):56－62.

[33] 隗玲, 许海云, 胡正银, 等. 学科主题演化路径的多模式识别与预测——一个情报学学科主题演化案例[J]. 图书情报工作, 2016,60(13):71－81.

[34] CHEN B, DING Y, MA F. Semantic word shifts in a scientific domain[J]. Scientometrics, 2018,117(1): 211 －226.

[35] LIU P, XIA H. Structure and evolution of co-authorship network in an interdisciplinary research field[J]. Scientometrics, 2015,103(1):101－134.

[36] 关鹏, 王曰芬. 学科领域生命周期中作者研究兴趣演化分析[J]. 图书情报工作, 2016,60(19):116－124.

[37] PRICE D. Citation measures of hard science, soft science, technology, and nonscience[M]// NELSON C E, POLLOCK D K. Comunication amoung scientists and engineers. Lexington, MA: Heath Lexington Books, 1970: 3－22.

[38] FREEMAN L. A set of measures of centrality based on betweenness author(s)[J]. Sociometry, 1977,40(1): 35－ 41.

[39] GROCH S, WILHELM I, DIEKELMANN S, et al. The role of REM sleep in the processing of emotional memories: evidence from behavior and event-related potentials[J]. Neurobiology of learning and memory, 2013,99(1):1－9.

[40] KOMOGORTSEV O V, KARPOV A. Automated classification and scoring of smooth pursuit eye movements in the presence of fixations and saccades[J]. Behavior research methods, 2013,45(1): 203－215.

[41] GERMAIN A. Sleep Disturbances as the hallmark of PTSD: where are we now? [J]. American journal of psychiatry, 2013,170(4):372－382.

[42] BHUIYAN M A, AMPORNARAMVETH V, MUTO S, et al. On tracking of eye for human-robot interface[J]. International journal of robotics & automation, 2004,19(1):42－54.

[43] VOELKER R. Eye tracking in surgical robotics[J]. Jama-journal of the American Medical Association, 2017,318(19):1858.

[44] VAN ECK N J, WALTMAN L. CitNetExplorer: a new software tool for analyzing and visualizing citation networks[J]. Journal of informetrics, 2014, 8(4): 802－ 823.

作者贡献说明:

梁镇涛:数据处理与论文撰写;

巴志超:数据收集与整理;

徐健:提出研究思路和方法,指导论文写作。

Development Path of Interdisciplinary Field Based on Citation Analysis: A Case Study of Eye Tracking

Liang Zhentao[1] Ba Zhichao[2] Xu Jian[3]

[1] Center for Studies of Information Resources, Wuhan University, Wuhan 430072

[2] School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094

[3] School of Information Management, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006

Abstract: [**Purpose/significance**] Interdisciplinary research has become an important paradigm and inevitable trend of modern scientific innovation research. Exploring the development pattern and path of interdisciplinary fields is of great significance for understanding the dynamic process of interdisciplinarity formation and development. [**Method/**

process] Taking the field of Eye Tracking (ET) as an example, the citation relationship of the literature was extracted and the subject was marked, and the citation networks of the literature and the subject level were constructed. To perform an analysis on the interdisciplinary development pattern of major disciplines in the ET field from a macro level, the cross-same field reference ratio, cross-same field citation ratio and Price's Index were calculated. Then this study examined the relationship between disciplines within and between different stages, and explored the relationship structure and role evolution of interdisciplinary development in different stages. Finally, to reveal the specific development path of ET development from the micro level, betweenness centrality analysis was performed to identify important documents that connect different disciplines. Moreover, this study examined the citation relations between important documents, highly cited documents, and references. [**Result/conclusion**] The development of ET field has three stages: incubation period, development period and maturity stage, and presents three types of subject development pattern: independent, interdisciplinary and learning discipline. The citation relationships between different disciplines are more dense and evenly distributed over time. Neuroscience, psychology and clinical medicine are important knowledge exporter during the interdisciplinary evolution. The vertical development of ET field is the basic theoretical innovation of independent disciplines, and the horizontal development is characterized by the deep integration of four types of disciplines, and the development path is presented as "independent - linear - mesh" pattern.

Keywords: citation analysis　interdisciplinary research　development pattern　evolution path　eye tracking